

<https://doi.org/10.69639/arandu.v13i3.2452>

Tendencias en agricultura y silvicultura de precisión: un análisis bibliométrico de la integración de datos, el apoyo a la toma de decisiones y la sostenibilidad

Trends in precision agriculture and forestry: a bibliometric analysis of data integration, decision support, and sustainability

Carlos Arturo Carvajal Chavez

ccarvajal@uagraria.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-2781-6953>

Universidad Agraria del Ecuador
Guayaquil, Ecuador

Artículo recibido: 10 julio 2026- Aceptado para publicación: 16 agosto 2026
Conflictos de intereses: Ninguno que declarar.

RESUMEN

Este estudio analiza las tendencias y la estructura conceptual de la investigación sobre agricultura y silvicultura de precisión, con énfasis en la integración de datos, los sistemas de apoyo a la toma de decisiones y la sostenibilidad. Se desarrolló un análisis bibliométrico de documentos indexados en Web of Science y Scopus, recuperados mediante una estrategia de búsqueda orientada a identificar estudios relacionados con tecnologías digitales, inteligencia artificial, teledetección, IoT, modelización predictiva y gestión sostenible. El proceso de selección documental siguió criterios de depuración basados en PRISMA, clasificación por cuartiles y revisión de metadatos, obteniéndose un corpus final de 411 documentos publicados entre 2003 y 2026. Los resultados evidencian un crecimiento acelerado de la producción científica, con una alta concentración de literatura reciente y una estructura temática organizada en torno a temas motores, básicos, de nicho y emergentes. Los clústeres de *precision agriculture* y *smart agriculture* se identificaron como núcleos articuladores del campo, mientras que inteligencia artificial, IoT y seguridad alimentaria funcionaron como bases transversales. Asimismo, la agricultura digital, la gobernanza tecnológica, el aprendizaje por refuerzo y las redes neuronales convolucionales aparecen como líneas especializadas o en desarrollo. Se concluye que el mapa temático permite reconocer patrones de centralidad y densidad que diferencian tendencias consolidadas, especializadas y emergentes, aportando una visión ordenada para orientar futuras investigaciones sobre sistemas agroforestales inteligentes, adaptativos y sostenibles.

Palabras clave: agricultura de precisión; silvicultura de precisión; análisis bibliométrico; mapa temático; sostenibilidad

ABSTRACT

This study analyzes the trends and conceptual structure of research on precision agriculture and forestry, emphasizing data integration, decision support systems, and sustainability. A bibliometric analysis was conducted on documents indexed in Web of Science and Scopus, retrieved using a search strategy designed to identify studies related to digital technologies, artificial intelligence, remote sensing, IoT, predictive modeling, and sustainable management. The document selection process followed screening criteria based on PRISMA, quartile classification, and metadata review, resulting in a final corpus of 411 documents published between 2003 and 2026. The results reveal rapid growth in scientific output, with a high concentration of recent literature and a thematic structure organized around driving, basic, niche, and emerging themes. "Precision agriculture" and "smart agriculture" clusters were identified as the field's core organizing elements, while artificial intelligence, IoT, and food security served as cross-cutting foundations. Additionally, digital agriculture, technology governance, reinforcement learning, and convolutional neural networks emerged as specialized or developing lines of research. The study concludes that the thematic map allows for the identification of centrality and density patterns that distinguish between consolidated, specialized, and emerging trends, providing an organized perspective to guide future research on smart, adaptive, and sustainable agroforestry systems.

Keywords: precision agriculture, precision forestry, bibliometric analysis, thematic map, sustainability

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International. 

INTRODUCCIÓN

La agricultura y la silvicultura de precisión se han consolidado como campos estratégicos para mejorar la gestión de los sistemas productivos mediante el uso intensivo de datos, sensores, teledetección, inteligencia artificial y herramientas de apoyo a la toma de decisiones. Su relevancia radica en la posibilidad de observar con mayor detalle la variabilidad espacial y temporal de los cultivos, los suelos y los ecosistemas forestales, permitiendo intervenciones más ajustadas a las condiciones reales del territorio. En este contexto, la investigación reciente ha mostrado que la integración de grandes volúmenes de datos y modelos predictivos puede contribuir a optimizar el uso de recursos, mejorar la productividad y reducir presiones ambientales (Barbosa et al., 2024; Bhat, 2021).

El avance de estas tecnologías ha transformado la forma en que se producen, organizan y utilizan los datos en el sector agroforestal. La disponibilidad de información procedente de sensores, imágenes satelitales, vehículos aéreos no tripulados, plataformas digitales y sistemas geoespaciales ha generado nuevas oportunidades para fortalecer la toma de decisiones en tiempo casi real. Sin embargo, este proceso también exige mejorar la calidad, interoperabilidad y reutilización de los datos. En esta línea, Ali (2022) destacan que los principios FAIR pueden favorecer un desempeño agrícola más sostenible al facilitar el acceso y uso eficiente de la información. De forma complementaria, los estudios sobre adopción de tecnologías de precisión evidencian que la transformación digital no depende únicamente de la disponibilidad de herramientas, sino también de factores organizacionales, técnicos y sociales que condicionan su implementación (Colussi, 2024; Hundal et al., 2023).

En el ámbito forestal, la digitalización también ha ampliado las posibilidades de monitoreo, planificación y gestión sostenible. La integración de tecnologías digitales en agronomía y silvicultura permite mejorar la trazabilidad, anticipar riesgos y responder con mayor precisión a condiciones ambientales cambiantes (Azlan et al., 2024). Asimismo, la inteligencia artificial aplicada a la silvicultura inteligente se ha orientado al fortalecimiento de la gestión del conocimiento, la eficiencia operativa y la sostenibilidad de los sistemas forestales (Damaeviius & Maskelinas, 2025). Esto evidencia que agricultura y silvicultura de precisión comparten una base común: el uso de datos para apoyar decisiones más eficientes, adaptativas y sostenibles.

A pesar del crecimiento de la producción científica, el campo presenta una estructura temática amplia y heterogénea. Los estudios disponibles abordan desde sensores, aprendizaje automático y teledetección hasta innovación responsable, gobernanza de datos, ética de la inteligencia artificial y sostenibilidad. Fleming et al. (2021) señalan que los futuros de la agricultura digital deben analizarse considerando los posibles impactos de las tecnologías emergentes sobre los sistemas productivos y sus actores. De manera similar, la discusión sobre el uso responsable de la inteligencia artificial en agricultura digital resalta la necesidad de evaluar

no solo la precisión técnica de los modelos, sino también sus implicaciones para la transparencia, la gobernanza y la toma de decisiones (Dara et al., 2022; Gardezi et al., 2022).

Por ello, resulta pertinente analizar cómo se ha organizado la investigación sobre agricultura y silvicultura de precisión, identificando sus principales tendencias, temas consolidados y líneas emergentes. Este artículo tiene como objetivo examinar la estructura científica del campo mediante un análisis bibliométrico de documentos indexados en Web of Science y Scopus. La pregunta de investigación que orienta el estudio es:

RQ1: ¿Cuáles son las tendencias, estructuras temáticas y patrones de evolución científica en la investigación sobre agricultura y silvicultura de precisión, considerando la integración de datos, los sistemas de apoyo a la toma de decisiones y la sostenibilidad?

En correspondencia con esta pregunta, se plantea la siguiente hipótesis de investigación:

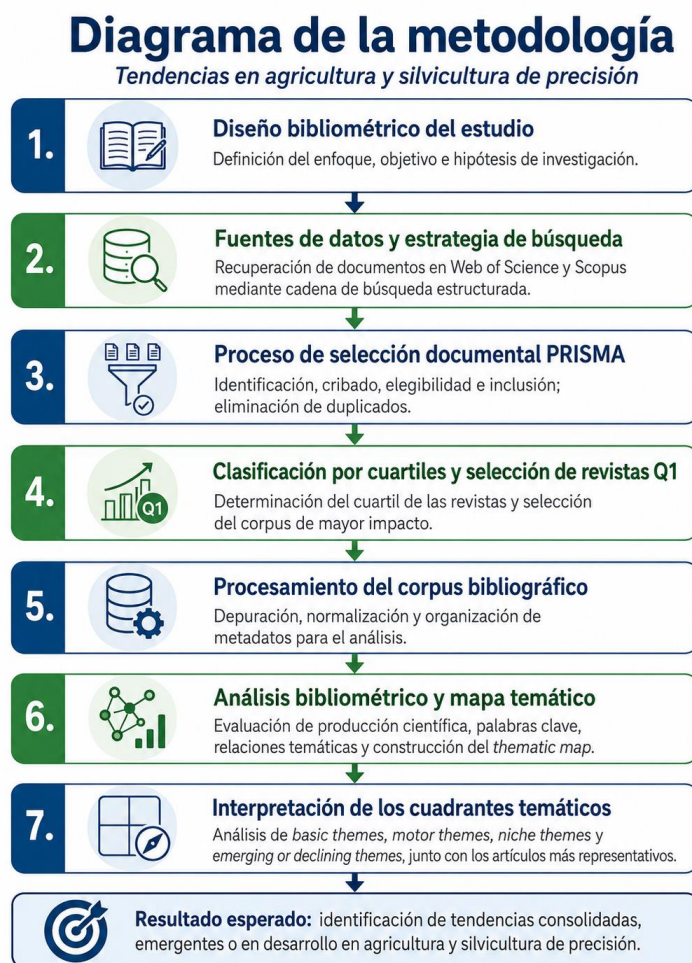
H1: La interpretación del mapa temático permitirá identificar patrones de agrupamiento, centralidad y densidad en la producción científica sobre agricultura y silvicultura de precisión, a partir de los cuales será posible determinar tendencias consolidadas, emergentes o en desarrollo.

METODOLOGÍA

Diseño bibliométrico del estudio

El estudio se desarrolló bajo un diseño bibliométrico de alcance descriptivo y analítico, orientado a examinar la evolución científica de la agricultura y la silvicultura de precisión. Este enfoque permitió identificar patrones de producción académica, relaciones temáticas y tendencias de investigación asociadas con la integración de datos, el apoyo a la toma de decisiones y la sostenibilidad. La investigación se basó en registros bibliográficos indexados en Web of Science y Scopus, los cuales fueron procesados para construir un corpus documental depurado. El diseño se centró en la interpretación del mapa temático, considerando la centralidad y la densidad como criterios para reconocer temas consolidados, emergentes o en desarrollo.

Figura 1
Diagrama metodológico del estudio



Fuentes de datos y estrategia de búsqueda

La recuperación de documentos se realizó en las bases de datos Web of Science y Scopus, seleccionadas por su cobertura internacional, calidad de indexación y uso frecuente en estudios bibliométricos. La estrategia de búsqueda se construyó en inglés, debido a que este idioma concentra la mayor parte de la producción científica indexada en ambas bases. La cadena combinó términos relacionados con agricultura de precisión, silvicultura de precisión, integración de datos, apoyo a la toma de decisiones y sostenibilidad. La búsqueda se aplicó en los campos de título, resumen y palabras clave, con el propósito de recuperar documentos directamente relacionados con el objeto de estudio. Se consideraron únicamente artículos científicos, excluyendo revisiones, documentos de conferencia, capítulos, editoriales y registros con información bibliográfica incompleta, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1
Estrategia de búsqueda aplicada en Scopus y Web of Science

Fuente	Ecuación de búsqueda	Total
Scopus	TITLE-ABS-KEY ((“precision agriculture” OR “smart agriculture” OR “digital agriculture” OR “precision farming” OR “precision forestry” OR	503

Fuente	Ecuación de búsqueda	Total
	“smart forestry” OR “digital forestry” OR “forest monitoring”) AND (“data integration” OR “big data” OR “remote sensing” OR “sensor data” OR “IoT” OR “geospatial data” OR “GIS” OR “machine learning” OR “artificial intelligence”) AND (“decision support” OR “decision support system*” OR “decision-making” OR “management decision*” OR “predictive model*” OR “optimization”) AND (“sustainability” OR “sustainable agriculture” OR “sustainable forestry” OR “environmental sustainability” OR “climate-smart” OR “resource efficiency”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, “ar”))	
Web of Science	(“precision agriculture” OR “smart agriculture” OR “digital agriculture” OR “precision farming” OR “precision forestry” OR “smart forestry” OR “digital forestry” OR “forest monitoring”) AND (“data integration” OR “big data” OR “remote sensing” OR “sensor data” OR “IoT” OR “geospatial data” OR “GIS” OR “machine learning” OR “artificial intelligence”) AND (“decision support” OR “decision support system*” OR “decision-making” OR “management decision*” OR “predictive model*” OR “optimization”) AND (“sustainability” OR “sustainable agriculture” OR “sustainable forestry” OR “environmental sustainability” OR “climate-smart” OR “resource efficiency”). Document type: Article.	326
Total		829

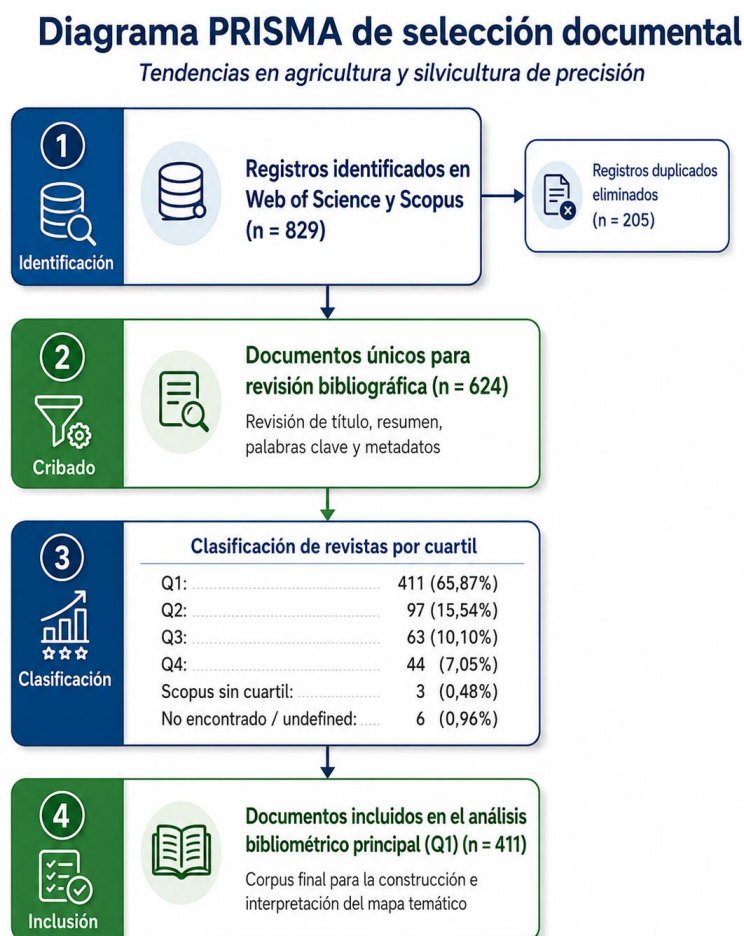
Proceso de selección documental PRISMA

El proceso de selección documental se desarrolló siguiendo las fases de identificación, depuración e inclusión propuestas por la metodología PRISMA. En la etapa inicial se integraron los registros recuperados desde Web of Science y Scopus, obtenidos mediante la estrategia de búsqueda definida para el estudio. Posteriormente, se realizó la depuración de la base consolidada mediante la identificación de documentos duplicados, considerando coincidencias en título, DOI, autores y año de publicación. Como resultado de este procedimiento, se eliminaron 205 registros repetidos, quedando un total de 624 documentos únicos para la fase de revisión y clasificación.

El corpus depurado fue examinado a partir de la información bibliográfica disponible, incluyendo título, resumen, palabras clave, fuente de publicación, identificadores y metadatos de indexación. Esta revisión permitió verificar la consistencia de los registros y asegurar que los documentos incluidos mantuvieran relación con la agricultura y la silvicultura de precisión. A partir de este conjunto documental se realizó la clasificación posterior por cuartiles de revista, identificándose 411 documentos publicados en revistas Q1, equivalentes al 65,87% del corpus único. Estos registros constituyeron la base principal para el análisis bibliométrico y la interpretación del mapa temático.

Figura 2

Diagrama PRISMA de selección documental



Los 411 registros Q1 identificados cumplieron con los criterios de disponibilidad y consistencia de los metadatos requeridos, por lo que fueron procesados en el análisis bibliométrico final.

Procesamiento del corpus bibliográfico

El corpus bibliográfico seleccionado fue procesado mediante la revisión y organización de los metadatos exportados desde Web of Science y Scopus. Se verificó la consistencia de campos como autores, título, año de publicación, revista, palabras clave, resumen, DOI y número de citas. Posteriormente, se normalizaron posibles variaciones en nombres de autores, fuentes y términos clave, con el fin de reducir errores de duplicidad o dispersión terminológica. Esta depuración permitió estructurar una base de datos homogénea y adecuada para el análisis bibliométrico, garantizando mayor precisión en la identificación de patrones de producción científica, relaciones temáticas y tendencias del campo.

Análisis bibliométrico y mapa temático

El análisis bibliométrico se orientó a examinar la evolución de la producción científica, los documentos más relevantes, las fuentes de publicación, los autores y las palabras clave

predominantes en el corpus seleccionado. Posteriormente, se construyó el mapa temático a partir del análisis de coocurrencia de palabras clave, con el propósito de identificar la estructura conceptual del campo. Este mapa se interpretó mediante dos dimensiones: centralidad y densidad. La centralidad permitió evaluar la importancia de cada tema dentro de la red temática, mientras que la densidad permitió estimar su grado de desarrollo interno. Con ello, fue posible clasificar los temas en cuadrantes y reconocer tendencias consolidadas, emergentes o en desarrollo.

Interpretación de los cuadrantes temáticos

La interpretación de los cuadrantes temáticos permitió profundizar en el papel que desempeñan las distintas líneas de investigación dentro del campo de la agricultura y la silvicultura de precisión. Los temas básicos fueron considerados como áreas transversales que sostienen el desarrollo del campo, mientras que los temas motores representaron líneas consolidadas con alta articulación conceptual. Los temas de nicho se analizaron como enfoques especializados con desarrollo propio, pero con menor conexión con otras áreas. Finalmente, los temas emergentes o en desarrollo fueron examinados con atención a su trayectoria temporal y a su relación con nuevas demandas científicas, tecnológicas y ambientales. Para fortalecer la interpretación, se revisaron los artículos más representativos de cada cuadrante, considerando su pertinencia temática, citación e incidencia en la discusión sobre integración de datos, toma de decisiones y sostenibilidad.

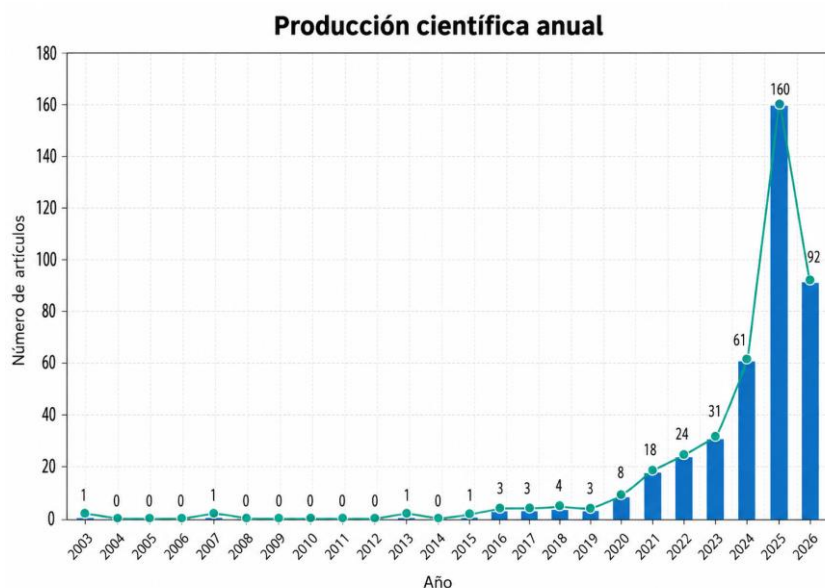
RESULTADOS

Caracterización bibliométrica del corpus

El corpus bibliométrico final estuvo conformado por 411 documentos publicados entre 2003 y 2026, distribuidos en 168 fuentes académicas. La amplitud temporal del periodo analizado permite observar la evolución de la investigación sobre agricultura y silvicultura de precisión desde sus primeras contribuciones hasta su consolidación reciente como un campo vinculado con la digitalización, la integración de datos y la sostenibilidad. La tasa de crecimiento anual fue de 21,67%, lo que evidencia una expansión sostenida de la producción científica y un interés creciente por el uso de tecnologías avanzadas en los sistemas agrícolas y forestales, como se observa en la Figura 3.

Figura 3

Producción científica anual sobre agricultura y silvicultura de precisión



La caracterización general del corpus se complementa con los principales indicadores bibliométricos, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Caracterización bibliométrica del corpus analizado



La edad promedio de los documentos fue de 1,87 años, lo cual indica que el corpus se encuentra compuesto mayoritariamente por literatura reciente. Este comportamiento es coherente con la rápida incorporación de enfoques asociados con sensores, datos geoespaciales, inteligencia artificial, aprendizaje automático y sistemas de apoyo a la toma de decisiones. En términos de impacto académico, los documentos registraron un promedio de 22,5 citas por publicación y 6,002 citas por año por documento, lo que sugiere una recepción científica relevante en un periodo

relativamente corto. Además, el corpus acumuló 55.627 referencias, reflejando una base teórica amplia y una fuerte articulación con investigaciones previas.

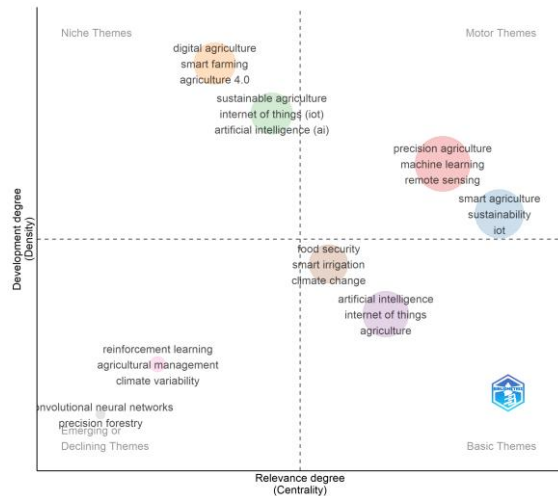
Figura 5



Estructura conceptual del campo: mapa temático, centralidad y densidad

Figura 6

Mapa temático de la agricultura y silvicultura de precisión



La Tabla 2 complementa la lectura del mapa temático al presentar los valores de centralidad y densidad de cada clúster. Los mayores valores de centralidad correspondieron a *smart agriculture* (5,397) y *precision agriculture* (5,296), lo que confirma su papel articulador dentro de la red temática. En términos de densidad, los clústeres más desarrollados internamente fueron *digital agriculture* (72,910), *sustainable agriculture* (64,431) y *precision agriculture* (63,154). Estos valores permiten diferenciar entre temas ampliamente conectados con el campo y temas con mayor desarrollo conceptual interno. Por el contrario, *reinforcement learning* y *convolutional neural networks* presentaron los menores niveles de centralidad, lo que indica una posición más periférica dentro del corpus analizado, aunque con potencial para consolidarse conforme aumenten las aplicaciones de aprendizaje automático avanzado en agricultura y silvicultura de precisión.

Tabla 2

Valores de centralidad y densidad de los clústeres temáticos

Clúster	Centralidad de Callon	Densidad de Callon
<i>precision agriculture</i>	5,296	63,154
<i>smart agriculture</i>	5,397	60,630
<i>sustainable agriculture</i>	1,961	64,431
<i>artificial intelligence</i>	4,697	53,303
<i>digital agriculture</i>	1,643	72,910
<i>food security</i>	3,470	57,969
<i>reinforcement learning</i>	0,250	51,389
<i>convolutional neural networks</i>	0,000	50,000

Interpretación del mapa temático

La interpretación del mapa temático permite comprender cómo se estructura conceptualmente la investigación sobre agricultura y silvicultura de precisión a partir de la relación entre centralidad y densidad. Los clústeres con mayor centralidad representan temas con mayor capacidad de conexión dentro del campo, mientras que aquellos con mayor densidad

evidencian un desarrollo interno más consolidado. En este sentido, el mapa no solo permite identificar los términos más frecuentes, sino también diferenciar el papel que cumple cada línea temática en la evolución científica del área. Los temas motores muestran las líneas que articulan la investigación actual; los temas básicos actúan como fundamentos transversales; los temas de nicho reflejan especializaciones con desarrollo propio; y los temas emergentes o en desarrollo señalan enfoques recientes que podrían adquirir mayor relevancia en los próximos años. Esta lectura resulta clave para responder la pregunta de investigación, ya que permite reconocer qué tendencias se encuentran consolidadas, cuáles se mantienen como áreas especializadas y cuáles representan nuevas oportunidades de investigación.

Temas básicos

Los temas básicos agrupan líneas transversales que sostienen la evolución reciente de la agricultura y la silvicultura de precisión. En este cuadrante, la literatura de los últimos cinco años muestra que el campo se apoya en la integración de sensores, IoT, aprendizaje automático, teledetección y sistemas de apoyo a la toma de decisiones. Kalyanaraman et al. (2022) destacan que los desafíos agrícolas actuales requieren infraestructuras capaces de combinar inteligencia artificial, ciencia de datos y conocimiento agronómico para transformar la toma de decisiones en sistemas productivos complejos. En esta misma línea, Eriyadi et al. (2025) proponen un marco de sensado sostenible que permite integrar datos distribuidos y mejorar la capacidad de monitoreo en contextos inteligentes.

Estos enfoques se articulan con estudios aplicados al riego, la predicción de recursos y la optimización de procesos agrícolas. La propuesta de sistemas de recomendación para riego evidencia cómo los datos generados por sensores pueden convertirse en alertas y decisiones operativas para mejorar la eficiencia hídrica (Veerachamy & Ramar, 2022). De forma complementaria, los modelos recientes sobre cadenas agroalimentarias muestran que la inteligencia artificial y la sostenibilidad se han convertido en componentes centrales para fortalecer la eficiencia, la trazabilidad y la resiliencia del sistema productivo (Herrera-Granda, 2026). En conjunto, estos temas funcionan como bases conceptuales porque conectan tecnología, datos y gestión sostenible.

Temas motores

Los temas motores representan las líneas con mayor articulación dentro del campo, principalmente asociadas con *precision agriculture*, *smart agriculture*, *machine learning*, *remote sensing*, *IoT* y sostenibilidad. En los últimos cinco años, estos trabajos muestran que la investigación ha avanzado desde el uso aislado de tecnologías digitales hacia sistemas integrados capaces de apoyar decisiones agronómicas en tiempo real. Gebresenbet et al. (2023) destacan que la agricultura inteligente requiere combinar datos agrícolas y ambientales procedentes de múltiples fuentes, junto con inteligencia artificial, blockchain, gobernanza de datos y sistemas de apoyo a la decisión. Esta visión es coherente con Bykzkan (2024), quienes plantean que la

digitalización solo fortalece la sostenibilidad cuando se diseña de manera integrada y orientada a requisitos productivos, ambientales y operativos.

Desde una perspectiva aplicada, los estudios recientes evidencian que la teledetección y el aprendizaje automático permiten mejorar la precisión de las estimaciones agrícolas, como ocurre en la predicción de humedad, rendimiento y parámetros de crecimiento de cultivos (Altherwy et al., 2024; Demissie, 2026). Asimismo, los marcos basados en IoT y microservicios han fortalecido la optimización del riego y la fertirrigación, al transformar datos de sensores en decisiones orientadas a reducir el desperdicio de agua y fertilizantes (Adamo et al., 2025). En silvicultura, la teledetección también aparece como una herramienta estratégica para planificar operaciones de cosecha y monitorear sus efectos sobre los ecosistemas forestales (Latterini, 2025). En conjunto, estos temas actúan como motores porque integran datos, automatización y sostenibilidad en la toma de decisiones.

Temas de nicho

Reflejan líneas especializadas que presentan un desarrollo conceptual propio, aunque con una conexión más limitada con el conjunto general del campo. En este cuadrante destacan estudios vinculados con agricultura digital, viticultura sostenible, plataformas de decisión, optimización de recursos y problemáticas sociales asociadas con la adopción tecnológica. Simeunovi et al. (2025) proponen un marco de apoyo a la decisión para viticultura sostenible que integra datos climáticos, fenología, sensores IoT y colaboración entre actores, mostrando cómo la especialización temática puede responder a problemas productivos muy concretos. De manera complementaria, Rackovi et al. (2026) avanzan hacia la implementación práctica de una plataforma digital para viñedos, orientada al monitoreo en tiempo real, alertas de riego, enfermedades y proyecciones climáticas.

Otro eje de este cuadrante se relaciona con la agricultura digital como proceso de transformación productiva y organizacional. Los modelos predictivos aplicados al desempeño agrícola sugieren que la digitalización puede mejorar la productividad y orientar políticas de modernización del sector (Varzaru, 2025). Sin embargo, esta transición no está exenta de tensiones. Estudios recientes advierten que las tecnologías digitales también pueden modificar la autonomía de los productores, generar asimetrías de información o ampliar brechas de acceso, especialmente en pequeños agricultores y sistemas expuestos a riesgos climáticos (Richards, 2025; Ullah, 2026). En este sentido, los temas de nicho no solo representan aplicaciones técnicas avanzadas, sino también espacios especializados donde la sostenibilidad depende de la calidad de los datos, la gobernanza tecnológica y la capacidad de adaptar las soluciones digitales a contextos productivos específicos.

Temas emergentes o en desarrollo

Los temas emergentes o en desarrollo se vinculan principalmente con aplicaciones avanzadas de aprendizaje por refuerzo, redes neuronales convolucionales, gemelos digitales,

modelos híbridos de inteligencia artificial y herramientas de sensado remoto aplicadas a problemas específicos de gestión agrícola y forestal. A diferencia de los temas motores, estos enfoques aún no muestran una articulación amplia dentro del campo, pero evidencian un alto potencial para transformar la toma de decisiones en contextos de incertidumbre climática, eficiencia de recursos y sostenibilidad. Wang et al. (2025) proponen un marco basado en aprendizaje por refuerzo para optimizar fertilización e irrigación considerando emisiones de N_2O y variabilidad climática, lo que muestra una transición hacia decisiones agrícolas sensibles al impacto ambiental. En una línea similar, Wang et al. (2026) integran modelos de confianza en esquemas de aprendizaje por refuerzo multiobjetivo, destacando que la adopción de inteligencia artificial depende no solo del rendimiento técnico, sino también de su alineación con la experiencia y aceptación de los agricultores.

El desarrollo reciente también incorpora modelos de predicción y visión computacional. Los enfoques basados en redes convolucionales y transformadores visuales han mejorado la detección de hileras de cultivo y la precisión espacial en operaciones de campo (Afzaal et al., 2025), mientras que las CNN optimizadas para microprocesadores permiten avanzar hacia diagnósticos de enfermedades en tiempo real y con bajo consumo computacional (Nugroho et al., 2024). En silvicultura, el uso de imágenes multispectrales UAV y arquitecturas U-Net++ para detectar trastornos radiculares en *Eucalyptus saligna* evidencia la expansión de estos métodos hacia el monitoreo forestal de precisión (Pereira et al., 2026). En conjunto, estos temas representan líneas recientes con capacidad de consolidarse.

DISCUSIÓN

Los resultados permiten responder a la pregunta de investigación al evidenciar que la agricultura y la silvicultura de precisión se organizan alrededor de una estructura temática diversa, pero articulada por tres ejes principales: integración de datos, apoyo a la toma de decisiones y sostenibilidad. La alta presencia de documentos recientes y el crecimiento anual observado indican que el campo se encuentra en una etapa de expansión acelerada, impulsada por la incorporación de sensores, teledetección, inteligencia artificial, IoT y modelos predictivos en contextos agrícolas y forestales.

El mapa temático muestra que *precision agriculture* y *smart agriculture* funcionan como núcleos motores del campo, debido a su alta centralidad y conexión con tecnologías aplicadas al monitoreo, la optimización productiva y la gestión sostenible. Esto sugiere que la producción científica no se limita a describir herramientas digitales, sino que avanza hacia sistemas integrados capaces de transformar datos en decisiones operativas. A su vez, los temas básicos, como inteligencia artificial, seguridad alimentaria e IoT, cumplen una función transversal, porque sostienen distintas aplicaciones relacionadas con eficiencia, trazabilidad y resiliencia de los sistemas productivos.

Los temas de nicho evidencian que la digitalización también genera líneas especializadas, como plataformas para viticultura, agricultura digital y gobernanza tecnológica. Estos enfoques muestran mayor desarrollo interno, aunque todavía con menor conexión con el resto del campo. Finalmente, los temas emergentes, como aprendizaje por refuerzo y redes neuronales convolucionales, revelan una agenda en formación orientada a decisiones adaptativas, automatización avanzada y monitoreo de precisión.

En conjunto, los hallazgos respaldan la hipótesis H1, ya que la interpretación del mapa temático permitió identificar patrones de agrupamiento, centralidad y densidad que diferencian tendencias consolidadas, especializadas y emergentes dentro de la investigación sobre agricultura y silvicultura de precisión.

CONCLUSIÓN

El estudio permitió examinar la estructura científica de la agricultura y la silvicultura de precisión mediante un enfoque bibliométrico orientado a identificar tendencias, patrones temáticos y niveles de desarrollo conceptual. A partir del corpus analizado, se evidenció que la producción científica reciente se encuentra en una fase de crecimiento acelerado, impulsada por la incorporación de tecnologías digitales, modelos predictivos, sensores, teledetección e inteligencia artificial en la gestión de sistemas agrícolas y forestales.

Los resultados muestran que el campo no se organiza de manera fragmentada, sino a través de una red temática donde convergen la integración de datos, el apoyo a la toma de decisiones y la sostenibilidad. En este marco, los temas motores reflejan líneas consolidadas con alta capacidad de articulación, especialmente en torno a la agricultura de precisión y la agricultura inteligente. Los temas básicos cumplen una función transversal al sostener aplicaciones vinculadas con inteligencia artificial, IoT y seguridad alimentaria, mientras que los temas de nicho evidencian áreas especializadas asociadas con agricultura digital, plataformas de decisión y gobernanza tecnológica. Por su parte, los temas emergentes muestran el avance de enfoques como el aprendizaje por refuerzo, las redes neuronales convolucionales y los gemelos digitales, los cuales podrían adquirir mayor centralidad en los próximos años.

En consecuencia, la hipótesis H1 se respalda, dado que la interpretación del mapa temático permitió reconocer patrones de agrupamiento, centralidad y densidad que distinguen tendencias consolidadas, especializadas y emergentes. Estos hallazgos aportan una visión ordenada del campo y ofrecen una base útil para orientar futuras investigaciones hacia sistemas agroforestales más inteligentes, adaptativos y sostenibles. Como línea futura, se recomienda profundizar en el análisis de la adopción tecnológica, la gobernanza de datos y las implicaciones sociales de la digitalización en contextos agrícolas y forestales diversos.

REFERENCIAS

- Adamo, T., Caivano, D., Colizzi, L., Dimauro, G., & Guerriero, E. (2025). Optimization of irrigation and fertigation in smart agriculture: An IoT-based micro-services framework. *Smart Agricultural Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100885>
- Afzaal, H., Rude, D., Farooque, A. A., Randhawa, G. S., Schumann, A. W., & Krouglicof, N. (2025). Improved crop row detection by employing attention-based vision transformers and convolutional neural networks with integrated depth modeling for precise spatial accuracy. *Smart Agricultural Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100934>
- Ali, B. (2022). The Role of FAIR Data towards Sustainable Agricultural Performance: A Systematic Literature Review. *AGRICULTURE-BASEL*. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020309>
- Altherwy, Y. N., Roman, A., Naqvi, S. R., Alsuhailbani, A., & Akram, T. (2024). Remote Sensing Insights: Leveraging Advanced Machine Learning Models and Optimization for Enhanced Accuracy in Precision Agriculture. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3455169>
- Azlan, Z. H. Z., Junaini, S. N., & Bolhassan, N. A. (2024). Evidence of the potential benefits of digital technology integration in Asian agronomy and forestry: A systematic review. *Agricultural Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.103947>
- Barbosa, J. M. R., Moreira, B. R. D. A., Carreira, V. D. S., Brito, F. A. L. D., Trentin, C., Souza, F. L. P. D., Tedesco, D., Setiyono, T., Flores, J. P., Ampatzidis, Y., Silva, R. P. D., & Shiratsuchi, L. S. (2024). Precision agriculture in the United States: A comprehensive meta-review inspiring further research innovation and adoption. *Computers and Electronics in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108993>
- Bhat, S. A. (2021). Big Data and AI Revolution in Precision Agriculture: Survey and Challenges. *IEEE ACCESS*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3102227>
- Bykzkan, G. (2024). Integrated design framework for smart agriculture: Bridging the gap between digitalization and sustainability. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141572>
- Colussi, J. (2024). A Comparative Study of the Influence of Communication on the Adoption of Digital Agriculture in the United States and Brazil. *AGRICULTURE-BASEL*. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071027>
- Damaevius, R., & Maskelinas, R. (2025). Enhancing Smart Forestry Through AI-Driven Knowledge Management: A Synergistic Approach to Efficiency and Sustainability. *Journal of Sustainable Forestry*. <https://doi.org/10.1080/10549811.2025.2513220>

- Dara, R., Hazrati, F. S. M., & Kaur, J. (2022). Recommendations for ethical and responsible use of artificial intelligence in digital agriculture. *Frontiers in Artificial Intelligence*. <https://doi.org/10.3389/frai.2022.884192>
- Demissie, W. A. (2026). Integration of artificial intelligence and remote sensing for crop yield prediction and crop growth parameter estimation in Mediterranean agroecosystems: Methodologies emerging technologies research gaps and future directions. *EUROPEAN JOURNAL OF AGRONOMY*. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127894>
- Eriyadi, M., Supangkat, S. H., & Hidayat, F. (2025). Sensing as a Service Reinvented: A Unified and Sustainable Sensing Framework for Smart X Development. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3558736>
- Fleming, A., Jakku, E., Fielke, S., Taylor, B. M., Lacey, J., Terhorst, A., & Stitzlein, C. (2021). Foresighting Australian digital agricultural futures: Applying responsible innovation thinking to anticipate research and development impact under different scenarios. *Agricultural Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103120>
- Gardezi, M., Adereti, D. T., Stock, R., & Ogunyiola, A. (2022). In pursuit of responsible innovation for precision agriculture technologies. *Journal of Responsible Innovation*. <https://doi.org/10.1080/23299460.2022.2071668>
- Gebresenbet, G., Bosona, T., Patterson, D., Persson, H., Fischer, B., Mandaluniz, N., Chirici, G., Zacepins, A., Komasilovs, V., Pitulac, T., & Nasirahmadi, A. (2023). A concept for application of integrated digital technologies to enhance future smart agricultural systems. *Smart Agricultural Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100255>
- Herrera-Granda, I. D. (2026). A Systematic Review of Recent Models for Agri-Food Supply Chain Management With Emphasis on the Application of Artificial Intelligence and Sustainability. *IEEE ACCESS*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3657974>
- Hundal, G. S., Laux, C. M., Buckmaster, D., Sutton, M. J., & Langemeier, M. (2023). Exploring Barriers to the Adoption of Internet of Things-Based Precision Agriculture Practices. *Agriculture (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010163>
- Kalyanaraman, A., Burnett, M., Fern, A., Khot, L., & Viers, J. (2022). Special report: The AgAID AI institute for transforming workforce and decision support in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106944>
- Latterini, F. (2025). Remote sensing for planning harvesting operations and monitoring their effects on the forest ecosystem: State of the art and future perspectives. *FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT*. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.123175>
- Nugroho, H., Chew, J. X., Eswaran, S., & Tay, F. S. (2024). Resource-optimized cnns for real-time rice disease detection with ARM cortex-M microprocessors. *Plant Methods*. <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01280-6>

- Pereira, S. S. D., Richter, V., Junior, N. B., Ferreira, R. A., Ferreira, G. V., Carneiro, A. T. J., Pott, L. P., & Amaral, L. D. P. (2026). Remote detection of root malformation disorder in *Eucalyptus saligna* using UAV multispectral imagery and U-Net++. *Computers and Electronics in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2026.111522>
- Rackovi, T., Ratkovi, K., Simeunovi, M., Kova, N., Menz, C., Fraga, H., Malheiro, A. C., Fernandes, A., & Santos, J. A. (2026). From Concept to Practice: Implementing a Knowledge-Driven Decision Support Platform for Sustainable Viticulture in Montenegro. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s26092843>
- Richards, C. (2025). Digital technology and on-farm responses to climate shocks: exploring the relations between producer agency and the security of food production. *AGRICULTURE AND HUMAN VALUES*. <https://doi.org/10.1007/s10460-024-10624-w>
- Simeunovi, M., Ratkovi, K., Kova, N., Rackovi, T., & Fernandes, A. (2025). A Knowledge-Driven Framework for a Decision Support Platform in Sustainable Viticulture: Integrating Climate Data and Supporting Stakeholder Collaboration. *Sustainability (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su17041387>
- Ullah, A. (2026). How misinformation and information asymmetry distort climate adaptation among smallholder farmers. *Agricultural Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2026.104660>
- Varzaru, A. A. (2025). Digital Revolution in Agriculture: Using Predictive Models to Enhance Agricultural Performance Through Digital Technology. *AGRICULTURE-BASEL*. <https://doi.org/10.3390/agriculture15030258>
- Veerachamy, R., & Ramar, R. (2022). Agricultural Irrigation Recommendation and Alert (AIRA) system using optimization and machine learning in Hadoop for sustainable agriculture. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13248-3>
- Wang, Z., Jang, W., Ruan, B., Wang, J., & Xiao, S. (2026). Developing and integrating trust modeling into multi-objective reinforcement learning for intelligent agricultural management. *Smart Agricultural Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2026.102145>
- Wang, Z., Xiao, S., Wang, J., Parab, A., & Patel, S. (2025). Reinforcement Learning-Based Agricultural Fertilization and Irrigation Considering N2O Emissions and Uncertain Climate Variability. *AgriEngineering*. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7080252>